

**OPERACIÓN DE PROTECCIONES EN MICRO-REDES BASADO EN FLUJOS
ÓPTIMOS DE POTENCIA AC**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
OPERACIÓN DE PROTECCIONES EN MICRO-REDES BASADO EN FLUJOS
ÓPTIMOS DE POTENCIA AC**

**AUTOR:
BYRON ISRAEL ANDRANGO SANTANDER**

**TUTOR:
ALEX VALENZUELA**

Quito, Abril 2018

Byron Israel Andrango Santander

**OPERACIÓN DE PROTECCIONES EN MICRO-REDES BASADO EN FLUJOS
ÓPTIMOS DE POTENCIA AC**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2018
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



Byron Israel Andrango Santander (Y'1984-M'05). Realizó sus estudios secundarios en el Instituto Técnico Superior "Sucre", se graduó de técnico industrial especialización electricidad. Egresado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en Operación de Protecciones en Micro-Redes Basado en Flujos Óptimos de Potencia AC.
byronec2009@hotmail.com

Dirigido por:



Alex David Valenzuela Santillán (Y'1989 – M'12). Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, donde se graduó de Ingeniero Eléctrico en diciembre 2013, Además realizó estudios de maestría en Newcastle University en el Reino Unido, donde obtuvo el título en Power Distribution Engineering MSc. Actualmente es profesor ocasional tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana.
avalenzuela@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2018 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO-ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Alex Valenzuela declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *Operación de Protecciones en Micro-Redes basado en Flujos Óptimos de Potencia AC* realizado por Byron Israel Andrago Santander, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Abril 2018



.....
Alex David Valenzuela Santillán
Cédula de identidad: 1721848644

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Byron Israel Andrango Santander, con documento de identificación N° 171767816-1, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación intitulado: “Operación de Protecciones en Micro-Redes basado en Flujos Óptimos de Potencia AC”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma



Nombre: Byron Israel Andrango Santander

Cédula: 171767816-1

Fecha: Quito, Abril 2018

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	2
2. IMPLEMENTACIÓN DE LA MICRO-RED EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	3
2.1. Problemas relacionados a protecciones habituales	4
2.2. Operación de la micro-red	4
2.3. Solución y Operación óptima de Protección en micro redes.....	4
2.4. Estudio de flujos de potencia.....	5
2.5. FOP-AC en Micro-Redes	6
3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE OPERACIÓN DE PROTECCIONES	7
3.1. Modelamiento del sistema.....	7
3.2. Modelamiento de optimización para micro-redes	8
4. RESOLUCIÓN DEL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN	9
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	10
5.1. Análisis en condiciones iniciales del sistema de prueba caso 1	10
5.2. Análisis en condiciones iniciales del sistema de prueba caso 2	10
5.3. Análisis del sistema con la integración de las micro-redes	11
5.4. Análisis minimización de pérdidas con la conexión de micro-redes	12
5.5. Análisis de la operación de protecciones en micro-redes.....	12
6. CONCLUSIONES	13
7. REFERENCIAS.....	13
8. ESTADO DEL ARTE.....	17

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Operación de protecciones para micro-redes.....	3
Figura 2. Cuadro de soluciones para la operación de protecciones	5
Figura 3. Sistema de 13 barras IEEE.	7
Figura 4. Capacidad del generador principal del sistema de 13 barras.	10
Figura 5. Voltajes iniciales del sistema de 13 barras.	11
Figura 6. Incorporación de las Micro-redes	11
Figura 7. Voltajes P.U. a través de la interconexión de las micro-redes.....	11
Figura 8. Minimización de pérdidas activas del sistema de 13 barras.	12
Figura 9. Corrientes de cortocircuito	13
Figura 10. Indicadores del estado del Arte - Temática	23
Figura 11. Indicadores del estado del Arte - Formulación del Problema.....	23
Figura 12. Indicadores del Estado de Arte - Solución	23

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. V p.u Optimización en porcentaje.....	12
Tabla 2. Corrientes de Cortocircuito	12
Tabla 3. Matriz del Estado del Arte	17

OPERACIÓN DE PROTECCIONES EN MICRO-REDES BASADO EN FLUJOS ÓPTIMOS DE POTENCIA AC

Resumen

En el presente artículo, se estudiará la operación de protecciones, basándose en un Flujo Óptimo de Potencia AC (FOP-AC), enfocado al funcionamiento de micro-redes en sistemas de distribución. Las micro-redes incluyen generadores de energía de capacidad reducida conectados a la carga, la interconexión de estas energías a la red de distribución aportará beneficios al sistema, aumentando la seguridad, integridad y la continuidad del servicio frente a contingencias que se presenten. En el artículo, se presenta un método matemático para el control de flujos de potencia enfocado en la interconexión de la micro-red al sistema de distribución. Para la operación de protecciones enfocado en micro-redes, se modelará una correcta operación de la protección encaminado a una óptima operación de las variables como voltajes, corrientes, potencias, etc. se manejará un modelo de programación no lineal (NLP) a través el manejo de un programa de optimización, que contiene como base el modelo de Distribución de 13 Barras de la IEEE y para las respectivas pruebas técnicas con los datos adquiridos en el programa, se utilizará el sistema estándar de 13 barras, en el programa de simulación eléctrica con el fin de comparar parámetros. El modelamiento del FOP AC en micro-redes garantiza un óptimo trabajo al instante de la operación de protecciones en micro-redes y minimizando las pérdidas del sistema.

Palabras Clave: Flujos óptimos de potencia; protecciones, micro-redes, sistemas de distribución, Pérdidas del sistema, balance de potencias.

Abstract

In the present article, the operation of protections will be studied, based on an Optimal Flow of Power AC (FOP-AC), focused on the operation of micro-networks in distribution systems. The micro-networks include reduced capacity power generators connected to the load, the interconnection of these energies to the distribution network will bring benefits to the system, increasing the security, integrity and continuity of the service in the face of contingencies that arise. In the article, a mathematical method is presented for the control of power flows focused on the interconnection of the micro-network to the distribution system. For the operation of protections in micro-networks, a correct operation of the protection aimed at an optimal operation of the variables such as voltages, currents, powers, etc. will be modeled. a non-linear programming model (NLP) will be used through the management of the optimization program, which is based on the IEEE 13-bar Distribution model and for the respective technical tests with the data acquired in the program, the standard system of 13 bars in the electric simulation program in order to compare the parameters. The modeling of FOP AC in micro-networks guarantees an optimal work of the operation of protections in micro-networks and minimizing system losses.

Keywords: Optimal power flow; protection, micro-grids, distribution systems, system losses, power balance.

1. Introducción

En la actualidad la energía eléctrica, es indispensable ya que a cada momento existe un crecimiento notable de la demanda eléctrica especialmente en los sistemas de Distribución como señala [1], [2], por ello en la actualidad se está trabajando en nuevas fuentes de energía alternativas, particularmente energías renovables (micro-redes), como son las eólicas, fotovoltaicas, biomasa, etc. que se puede usar para mejorar el sistema de distribución descrito en [3], [4]. Hay un sin número de estudios que se están empleando con el propósito de mejorar estas nuevas tecnologías, tal es el caso que para la investigación del presente artículo se estudiará un problema de optimización no lineal (NLP) señalado en [5], [6], que inicia desde un flujo de potencia estándar mencionado en [7]. Mediante herramientas matemáticas y con la ayuda eficaz del programa de optimización se logrará cumplir con el objetivo de la investigación, a través de un flujo óptimo de potencia [8], que optimizará los parámetros de la micro-red y del sistema de prueba de 13 barras de un sistema de distribución de la IEEE [9]. De igual manera se analizará el programa de simulación eléctrica, el sistema de 13 barras, que servirá como base para la comparación de resultados [10]. Hay que indicar que el objetivo del (FOP) es minimizar o maximizar uno o varios parámetros de operación, sujeta a restricciones de igualdad y desigualdad [6], [9], [11]. Los autores señalan en [8], [12], que una vez ejecutado el flujo óptimo de potencia se procederá al estudio de la integración de la micro-red al sistema de distribución, esta tecnología está tomando fuerza los últimos años gracias a sus enormes beneficios de operación, ya que tiene la capacidad de operar conjuntamente con el sistema de distribución u operar como un sistema autónomo [13], [14].

Una micro-red proporciona varios beneficios al sistema de distribución, cuando exista sobrecargas, mayor demanda local, fallas y diferentes contingencias que pueden afectar el sistema de Distribución [11], [15]. Frente a estos beneficios la micro-red genera mayor control de la red, aumentando la confiabilidad y calidad del servicio eléctrico [9]. La micro-red está ocupando un mayor interés enfocado en la generación de energía eléctrica, dado que las investigaciones ya realizadas demuestran un camino a tener una mejor eficiencia del sistema, costos económicos reducidos, mejor calidad de energía y mayor seguridad del sistema [16], [17], [18].

Una parte muy importante para la integración de la micro-red al sistema de distribución son las protecciones, donde su principal función es la de proteger frente a contingencias como aumento de demanda, sobrecargas, cortocircuitos, etc. [19]. De acuerdo a la investigación planteada se trabajará el tema de operación de protecciones en micro-redes, para el desarrollo se debe entender que un esquema de protección en micro-redes, depende principalmente de relés de baja tensión para funcionamiento en isla y relés de sobre corriente para su funcionamiento conectado a la red de distribución [20], [21], [22], [23]. Se analizará la operación de protecciones en micro-redes, conectado al sistema de 13 barras con sus respectivos parámetros de operación, en caso de falla [20], [24]. Finalmente, pese a que el sistema de distribución se encuentra protegido, se mejorará el tema de las pérdidas técnicas que todo sistema posee que se da por bajos niveles de voltaje, corrientes elevadas, etc. Sin embargo, para el estudio del presente artículo se desarrollará mediante un programa de optimización la minimización de pérdidas y así lograr resolver los problemas suscitados [25], [26].

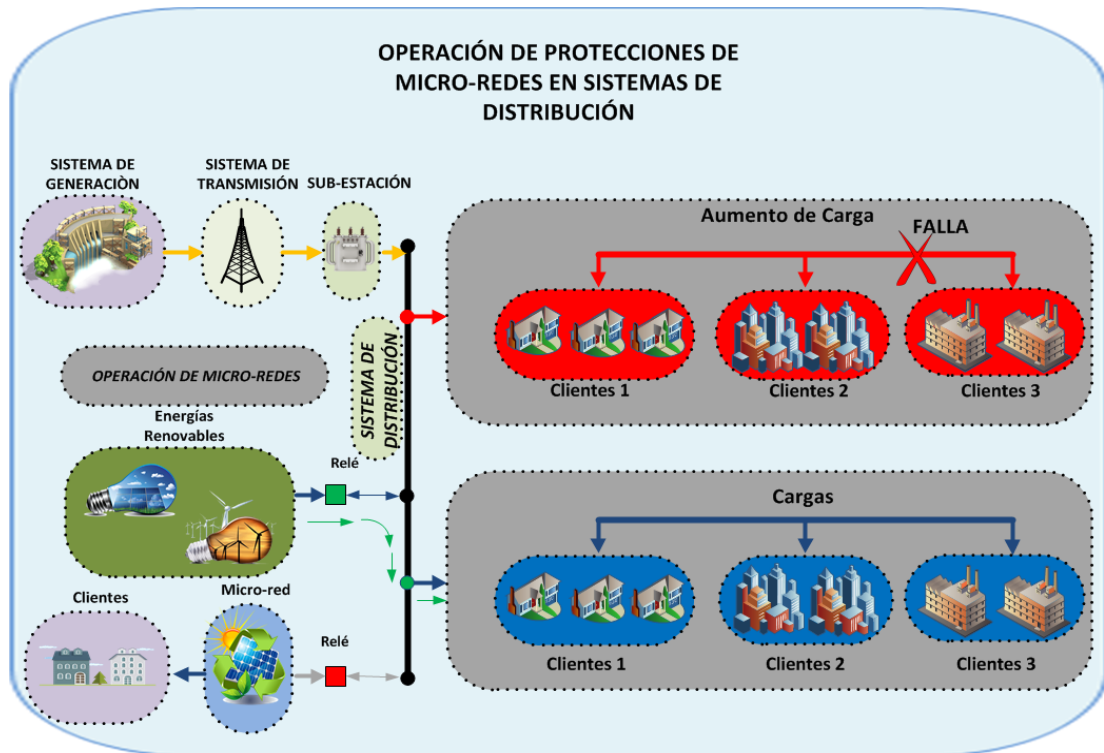


Figura 1. Operación de protecciones para micro-redes.

En adelante este artículo se organizará del siguiente modo. En la Sección 2 se explicará la implementación de la micro-red a sistemas de distribución, además incluirá la definición de la operación de micro-redes, aplicadas al estudio de flujos óptimos de potencia. En la Sección 3 se desplegará la formulación del problema planteado, con el modelamiento del sistema de prueba, enfocado en el desarrollo de la minimización de pérdidas. En la Sección 4 se trabajará en el Algoritmo de Optimización. Y finalmente en la sección 5 se desarrollará el Análisis de Resultados.

2. Implementación de la Micro-red en sistemas de Distribución

Las micro-redes al ser nuevas tecnologías de generación eléctrica, se encuentran aplicadas especialmente en energías renovables, puesto que el agotamiento de varios combustibles fósiles es cada vez mayor, por tal razón se están explotando las fuentes

de energías renovables por el simple hecho de que ayudan al medio ambiente además son sistemas de rápida instalación y ejecución [5]. Las energías que se están empleando son fotovoltaicas, eólicas, mareo motriz, biomasa, hidroeléctricas pequeñas, etc. con esto se tiene energía limpia [14], [24].

Se conoce que el sistema de distribución opera en condiciones con alta carga, lo que se produce distintas pre-fallas o fallas que pueden afectar al sistema eléctrico de potencia, con inestabilidades de voltaje, pérdidas del sistema y baja calidad del servicio, de tal forma que se tiene un sistema con limitaciones al instante de operar [2], [12]. Los autores mencionan en [4], [27], que las micro-redes van a tener un papel muy importante en la planificación, desarrollo y trabajo del sistema de distribución, capaz de adaptarse a la interconexión de cargas que incluyen el intercambio de potencia activa y reactiva [9], [16], [19].

2.1. Problemas relacionados a protecciones habituales

Mediante la incorporación de las micro-redes interconectadas al sistema de distribución, tiende a un aumento en la capacidad de cortocircuito, si bien la corriente de falla de la micro-red tiene que limitarse a un máximo de dos veces la corriente nominal [15], [23], [28].

Existen estudios donde se mencionan tres problemas relacionados a los esquemas de protecciones en redes de distribución conectadas con micro-redes [29].

El primer problema se refiere al retraso del funcionamiento de los relés, esto se ocasiona debido a la contribución de corriente de falla por parte de la micro-red, ya que una fracción de la corriente es medida por los relés de sobre-corriente y en consecuencia de esa reducción en la corriente, causa una mala operación en las protecciones del sistema de distribución [15], [30].

El segundo problema es cuando se dispara la protección del sistema de distribución por una falsa alarma de fallo, este problema se refiere a que cuando se provoca una falla fuera del alimentador en este caso producida por la micro-red. La corriente de falla fluye hacia el alimentador activando el relé, y por efecto interrumpiendo o afectando la energía eléctrica [28]. Con la investigación de la operación de protecciones en micro-redes se evitara estos problemas [29].

El tercer problema es la operación correcta de la protecciones frente a fallas bidireccionales, puesto que las corrientes de falla se alteran a medida que las micro-redes interactúen con el sistema de distribución llevando a tener malas operaciones, por lo tanto mediante el modelamiento de las micro-redes que se presentará en el presente artículo, se desarrollará una técnica con el fin de tener la

continuidad del servicio con apoyo de las micro-redes [30], [31].

2.2. Operación de la micro-red

La micro-red es una red inteligente que posee grandes ayudas en los SEP, que específicamente se trabajará en un sistema de Distribución, la micro-red es conocida como una fuente de energía eléctrica que puede funcionar en dos escenarios [4], [27], [31], una de ellas es conectada a la red de distribución principal, con el objetivo de tener un sistema de distribución más eficiente y seguro [27]. La otra forma de operar es cuando se separa del sistema eléctrico principal y de esta manera puede funcionar autónomamente según las condiciones de su infraestructura y operación [4], [8], [21]. Hay que mencionar que las micro-redes sirven en áreas geográficas distribuidas para mantener el flujo de energía activa, con la característica que la micro-red se encuentre cerca de la carga, con el objetivo que la entrega de la energía eléctrica se confiable y reduzca las pérdidas de transmisión [1], [11].

Cuando existe cortes de energía abruptas en la micro-red, esta puede proveerse de la red de distribución principal con el objetivo de abastecer su demanda, de igual manera inversamente si la red principal tiene alguna falla puede recurrir a la micro-red, con la función de mantener la continuidad del servicio eléctrico [5], [19].

2.3. Solución y Operación óptima de Protección en micro redes

El uso de las micro-redes presenta un sin número de desafíos al momento de operar, controlar, proteger y mantener estable el flujo de energía en el sistema [20]. Ya que la introducción de las micro-redes al sistema de distribución produce cambios en los niveles, en las direcciones de corriente y el resultado es un funcionamiento incorrecto.

De tal manera, mediante los diferentes modelamientos se deberá lograr una operación adecuada y optima de los relés de sobre-corriente en los sistemas de distribución[21], [28].

Para la solución de la operación de protecciones de acuerdo a los distintos problemas anteriormente señalados, las micro-redes están forzadas a actuar de una manera correcta con el sistema de distribución, por lo tanto, algunas investigaciones han apuntado a dos soluciones para corregir los problemas [32], [33].

2.3.1. Desconexión de la micro-red ante perturbaciones

En este contenido se menciona y se propone que se debe desconectar las micro-redes de la red de distribución, cuando existan varias perturbaciones de tensión o frecuencia después de un cierto periodo de tiempo señalado. Como consecuencia, el sistema de distribución se restaurará de acuerdo a su configuración normal, enfocándose en desconectar la micro-red antes que actúe el reconectador [15], [33]

2.3.2. Asignación optima de micro-redes

Si bien la integración de micro-redes genera muchos beneficios al sistema de distribución, se debe limitar la capacidad de operación de las micro redes dimensionando la interconexión adecuada, de manera de no afectar la operación de protecciones [15].

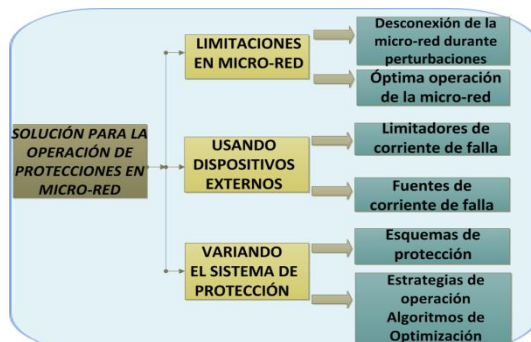


Figura 2. Cuadro de soluciones para la operación de protecciones [32] .

2.3.3. Importancia del Relé de sobre-corriente en micro-redes

Los sistemas de distribución de tipo convencionales poseen una estructura radial, puesto que la energía fluye en una sola dirección desde la subestación a las cargas. Así que con la introducción de las micro-redes se está impulsando la integración de redes inteligentes (Smart Grid), algunos sistemas de distribución modernos que incluyan estas nuevas micro-redes ya sea en un sistema radial convencional o un sistema en malla [24], [34]. Por lo tanto, estos sistemas están basados en relés de sobre-corriente [21].

Para la operación de protecciones se propone un esquema de protección para micro-redes a través del funcionamiento de relés de baja tensión para operar en isla o relés de sobre-corriente que opera conectado a la red. Para el estudio y análisis de la protección de la micro-red, se estudiará el relé de sobre-corriente, que debe considerar el flujo de potencia bidireccional y los niveles de corriente de falla [20], [35]. Una aclaración importante es que los dispositivos de protección se encuentran ubicados en el lado de la micro-red, así que, no se considera la protección del alimentador de la micro-red. Gracias a las técnicas de optimización y con el modelamiento de prueba del sistema de 13 barras tendrá una operación correcta de las protecciones y eficiente [22].

2.4. Estudio de flujos de potencia

Los flujos de potencia como principal objetivo es el de analizar, estudiar, comprender, etc., los SEP, sujeto a diferentes condiciones de operación [6], [36]. Hay que mencionar que esta herramienta es muy utilizada en sistemas de generación, transmisión y para el caso de esta investigación será aplicada para sistemas de distribución. Ya que mediante el análisis se puede

desarrollar alternativas de operación, diseño, planificación, obteniendo la máxima utilidad de los parámetros implicados al sistema [13], [25].

Existen algunos métodos que son complejos para emplear los flujos de potencia, pero para la investigación del artículo se procederá a describir las principales variables, ecuaciones y resultados para la estudio de los flujos de potencia en sistemas eléctrico de potencia [6], [10].

Se empezará expresando las primeras ecuaciones las cuales ayudarán a plantear la Y de barra, a través de las siguientes ecuaciones servirá para el modelamiento de los flujos de potencia [37].

En la ecuación (1), indica la ecuación relacionada a las corrientes en cada uno de los nodos, puesto que, este parámetro afectara al momento de realizar la matriz de admitancias.

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (1)$$

Donde:

I_i ; Corrientes en cada uno de los nodos del sistema.

Mediante las ecuaciones anteriores indicadas, en la ecuación (2) me marca el desarrollo de la matriz de barra [38].

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & Y_{n3} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

Posteriormente una vez ya realizada la matriz, y señalando la ecuación (3) correspondiente a la ecuación I_i de inyección de corriente en los nodos [10].

$$I_i = Y_{i1} V_1 + Y_{i2} V_2 \dots Y_{in} V_{in} = Y_{ii} V_i + \sum_{n=1}^N Y_{in} V_n, i \in N \quad (3)$$

A través de las ecuaciones ya indicadas, el siguiente paso es la

determinación de las ecuaciones (4), (5) correspondientes a potencia activa y potencia reactiva [10].

$$P_i - jQ_i = Y_{ii} V_i^2 + V_i * \sum_{n=1}^N Y_{in} V_n \quad (4)$$

$$P_i - jQ_i = |Y_{ii} V_i^2| < (\theta_{ii}) + \sum_{n=1}^N |V_i Y_{in} V_n| < (\theta_{in} + \delta - \delta i), i \in N \quad (5)$$

Para mayor conocimiento del desarrollo de los flujos de potencia se mostrara en las ecuaciones (6), (7), la descomposición tanto de la potencia activa y potencia reactiva [13], [36].

$$P_i(V, \theta) = |V_i|^2 G_{ii} + \sum_{k=1}^N |V_i V_k| [G_{ik} \cos(\theta_k - \theta_i) - B_{ik} \sin(\theta_k - \theta_i)], i \in N \quad (6)$$

$$-Q_i(V, \theta) = |V_i|^2 B_{ii} + \sum_{k=1}^N |V_i V_k| [B_{ik} \cos(\theta_k - \theta_i) - G_{ik} \sin(\theta_k - \theta_i)], i \in N \quad (7)$$

Donde;

P_i ; Variable de flujo de potencia activa.

Q_i ; Variable de flujo de potencia reactiva.

N ; Numero de nodos del sistema.

$|V_i, V_k|$; Módulos de voltaje del nodo i y nodo k.

2.5. FOP-AC en Micro-Redes

El flujo óptimo de potencia, radica en definir la función objetivo ya sea para maximizar o minimizar variables que mediante el proceso del modelamiento se obtendrá una operación optima [5], [9], [11].

Para el modelamiento del FOP hay que señalar los cuatro elementos para emplearse.

- La función objetivo a ser optimizada.
- Base de datos, que actúan en el modelamiento de optimización.

- c) Las variables que intervienen dentro del modelamiento de optimización.
- d) Señalar las restricciones del sistema que intervendrán en la optimización.

La programación no lineal (NLP), es una técnica matemática compleja de igualdades y desigualdades, que sirve para el desarrollo de los flujos de potencia, con la finalidad de resolver problemas de optimización analizando la operación de cada elemento que compone el sistema. Esta herramienta se aplica dado que, al momento de simularlo es casi como tener un sistema real [6], [10], [13].

3. Formulación del problema de operación de protecciones

Un modelamiento de operación de protecciones, minimiza las pérdidas del sistema eléctrico, manteniendo los parámetros óptimos al momento de conectarse o desconectarse a la red [25]. Por lo que, la operación de protecciones en micro-redes causan varios problemas específicamente al momento de conectarse a la red de distribución, se han realizado estudios que involucran técnicas lineales, no lineales y heurísticas con el fin de lograr tener un sistema seguro y confiable [24],[39]. Otra problema que se presenta en sistemas de distribución es la respuesta incorrecta que muestran los dispositivos de protección y por tal razón se debilita la confiabilidad de las micro-redes, así que se plantea el tema de optimización [39].

El modelamiento de optimización se basa mediante los flujos óptimos de potencia, involucrando todas las variables tales como potencia activa, potencia reactiva, voltajes, corrientes, ángulos, etc., del sistema de prueba de 13 barras, mediante aquello se desea

tener un sistema óptimo que opere al momento de conectarse a la red y en isla, además operar la protección de la micro-red y encontrar los valores óptimos de las variables para su buen funcionamiento [6], [26].

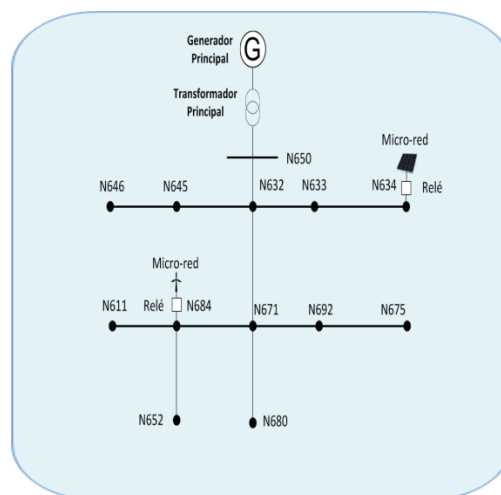


Figura 3. Sistema de 13 barras IEEE.

3.1. Modelamiento del sistema

Las herramientas matemáticas para operar los sistemas de distribución serán claves para el estudio y análisis de los resultados logrados. Para el estudio del flujo óptimo de potencia AC [9], [11], se tendrá las diferentes condiciones de operación, donde se incluirá variables, restricciones y la función objetivo. Este estudio de optimización se lo realizará mediante el programa de optimización y para la aplicabilidad del modelamiento se lo trabajará en base al sistema de Distribución de 13 barras de la IEEE. Se debe mencionar que el flujo de potencia en una micro-red es dinámico y bidireccional, por el hecho que se intercambia energía eléctrica con la red principal, por lo cual se tendrá restricciones para su estudio de la investigación [13],[36].

3.1.1. Análisis de Minimización de pérdidas en sistemas de distribución

Las pérdidas en los sistemas de distribución cambian con referencia a

distintos factores, como puede ser a través de las líneas de transmisión y distribución, en los condensadores, en unidades de transformación y en los aisladores [26], [38].

Como conocimiento las pérdidas de potencia real se deben a la resistencia que tienen las líneas, y consecuente a ello se reduce la eficiencia. En las pérdidas de potencia reactiva se debe a elementos reactivos y además hay que considerar que el flujo de potencia reactiva de mantenerse en un nivel adecuado con el objetivo de tener un voltaje estable en el sistema. Hay que considerar que los diferentes tipos de cargas conectadas a la red eléctrica de distribución perturban y aumenta el nivel de pérdidas de energía, como puede ser las micro-redes u otros tipos de generación conectados al sistema. Mediante el presente artículo se trata de resolver el problema de pérdidas a través de la optimización [25], [26], [36].

3.2. Modelamiento de optimización para micro-redes

El sistema de distribución tiende a aumentar su carga, puesto que existe mayor consumo de energía por el incremento de usuarios. Mediante la incorporación de las micro-redes se desea tener un sistema estable. Con lo cual, mediante la optimización se lograra controlar los parámetros del sistema para su optimo trabajo. La solución al problema de optimización es la minimización de pérdidas activas planteado como la función objetivo detallada en la ecuación (8), [12], [36].

$$FO = \text{Min} \sum_{i=1}^N (P_{gi} - P_{di}) \quad (8)$$

Dónde:

P_{gi} ; Potencia generada en el nodo i.

P_{di} ; Potencia demandada en el nodo i.

Para el tema de restricciones, la solución de optimización se tendrá las siguientes ecuaciones (9) y (10) donde se indica las potencias activas y reactivas [6].

$$P_i(V, \theta) = |V_i|^2 G_{ii} + \sum_{k=1}^N |V_i V_k| [G_{ik} \cos(\theta_k - \theta_i) - B_{ik} \sin(\theta_k - \theta_i)] \quad (9)$$

$$-Q_i(V, \theta) = |V_i|^2 B_{ii} + \sum_{k=1}^N |V_i V_k| [B_{ik} \cos(\theta_k - \theta_i) - G_{ik} \sin(\theta_k - \theta_i)] \quad (10)$$

Dónde:

P_i ; Inyección de P en el nodo i.

Q_i ; Inyección de Q en el nodo i.

G_{ik} ; Parte real matriz de admitancias.

B_{ik} ; Parte imaginaria matriz de admitancias.

θ_{ik} ; Ángulo entre nodos i y k.

V_i ; Voltaje en el nodo i.

V_k ; Voltaje en el nodo k.

Las ecuaciones del balance de las potencias indicadas en (11) y (12), ciertamente son muy importantes al momento de realizar la optimización, ya que es una restricción que envuelve a la micro-red con el sistema de distribución [10], [13], [38].

$$P_{gi} - P_{di} - P_i = 0 \quad (11)$$

$$Q_{gi} - Q_{di} - Q_i = 0 \quad (12)$$

Dónde:

Q_{gi} ; P reactiva generada en el nodo i.

Q_{di} ; P reactiva demandada en nodo i.

En las siguientes ecuaciones (13), (14), (15) y (16), son restricciones que intervendrán en el modelamiento como son: los límites admitidos de voltaje, potencia activa potencia reactiva y ángulos [13].

$$V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max} \quad (13)$$

$$\theta_{i \min} \leq \theta_i \leq \theta_{i \max} \quad (14)$$

$$P_{gi \min} \leq P_{gi} \leq P_{gi \max} \quad (15)$$

$$Q_{gi \min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi \max} \quad (16)$$

Dónde:

$V_{i \min}, V_{i \max}$; Voltajes máximos y mínimos en el nodo i.

$P_{gi \min}, P_{gi \max}$; Límites máximos y mínimos de potencia activa en nodo i.

$Q_{gi \min}, Q_{gi \max}$; Límites máximos y mínimos de potencia reactiva en el nodo i.

4. Resolución del Algoritmo de Optimización

A través de las herramientas matemáticas manejadas se logrará resolver los problemas de operación, que involucra al sistema de prueba de 13 barras de la IEEE de distribución y la incorporación de micro-redes.

Como primer paso se tendrá una base de datos del sistema de prueba de 13 barras, que poseerá todos los parámetros para el ingreso al flujo de potencia, los parámetros que intervendrán serán voltajes, corrientes, potencias, ángulos, resistencia de las líneas, etc.

De igual manera se incluirá distintas variables de las micro-redes, con sus respectivos parámetros de operación para la interconexión con el sistema de distribución.

Para la solución del flujo óptimo de potencia, mediante el programa de optimización, se incluirá restricciones de igualdad y desigualdad, y con los límites máximos y mínimos permitidos para la operación.

Una vez modelando el flujo de potencia, el programa de optimización adquirirá todas las variables del sistema con la micro-red para optimizar y obtener datos óptimos de operación. Para el análisis de resultados se tendrá dos escenarios, aprovechando la ayuda del programa de simulación eléctrico. Primeramente, se modelara el sistema

de prueba de 13 barras, en el programa de simulación eléctrico sin incluir la optimización para obtener datos iniciales de operación.

La investigación se basa en resolver problemas cotidianos que poseen los sistemas de distribución, por ejemplo, cuando se tiene mayor demanda y el sistema eléctrico se encuentre operando con mayor exigencia.

Por lo que mediante la inclusión de las micro-redes y con la herramienta del programa de optimización se obtendrá los datos óptimos para una mejor operación, teniendo como resultado la minimización de pérdidas en las redes de distribución.

Mediante los datos adquiridos en el programa de optimización y programa de simulación eléctrico se realizará una comparación de ambos resultados, con el objetivo principal de demostrar que los problemas serán resueltos.

Algoritmo de Optimización

Paso 1: Ingreso de datos del sistema de prueba (EXCEL).

Datos del sistema de Distribución de 13 barras IEEE.

Paso 2: Leer: variables del sistema V, I, P, Q, θ, R, X .

Leer: variables de la micro-red.

Paso 3: Agregación de ecuaciones de flujos de potencia al programa de optimización.

Set: flujo de potencia activa
 P_i

Set: Flujo de potencia reactiva
 Q_i

Paso 4: Restricciones de igualdad

Set: Balance de potencias activa y reactiva.

$$P_{gi} - P_{di} - P_i = 0$$

$$Q_{gi} - Q_{di} - Q_i = 0$$

Paso 4.1: Restricciones de desigualdad

$$V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max}$$

$$\theta_{i \min} \leq \theta_i \leq \theta_{i \max}$$

$$P_{gi \min} \leq P_{gi} \leq P_{gi \max}$$

$$Q_{gi \min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi \max}$$

Paso 4.2: Ejecución del flujo óptimo de potencia.

Paso 4.3: Obtención parámetros óptimos de operación.
Flujo de potencia bidireccional
Interconexión Sistema de Distribución – Micro-red

Paso 4.4: Minimización Función objetivo, minimización de pérdidas.

$$FO = \text{Min} \sum_{i=1}^N (P_{gi} - P_{di})$$

Paso 5: Visualizar los resultados de comparación programa de simulación – programación de optimización.

Paso 6. Fin del algoritmo.

5. Análisis de resultados

Para el análisis de los resultados se ha propuesto una estrategia para una correcta operación de protecciones para micro-redes relacionados a sistemas de Distribución, basados en flujos óptimos de potencia adquiridos mediante el programa de optimización. Se incluirá dos micro-redes para el caso de estudio, basándose en fuentes de energías renovables como fuentes de generación. Cada fuente aportará una cantidad de potencia al sistema de distribución, con la finalidad de mantener el sistema de distribución estable y operable.

La penetración de nuevas tecnologías está orientada para dar soluciones de operatividad, en los diferentes casos de inestabilidades, perturbaciones y aumento de cargas. Por lo tanto, con el modelamiento de optimización se logrará tener una operación óptima de las variables asociadas como son tensión, corriente, potencias, etc., y además se constituirá de restricciones operacionales para su correcto trabajo. Para la interconexión entre estos sistemas se analizará la operación de protecciones, puesto que, se estará controlando niveles de los parámetros eléctricos. En caso de ocurrir cambios en el sistema, el relé de sobre-corriente será el encargado de emitir una señal

de desconexión del sistema, actuando como un sistema aislado.

Por lo que, a través del modelamiento de se logrará optimizar la operación de las micro-redes y solucionando el problema de pérdidas activas.

Finalmente, para la demostración de resultados se hará la comparación de valores, relacionando, el programa de simulación eléctrico y el programa de optimización visualizando las mejoras en cada caso de estudio.

5.1. Análisis en condiciones iniciales del sistema de prueba caso 1

Para el análisis en condiciones iniciales, se utilizó el sistema de prueba de 13 barras de la IEEE de un sistema de distribución, con todos los valores de generación y consumo, el cual consta con un generador principal con sus parámetros eléctricos para abastecer todas las cargas. En la figura 4 se muestra los consumos de cada una de las cargas establecidas en el sistema e incluyendo la potencia entregada por el generador conectado a la barra 1.

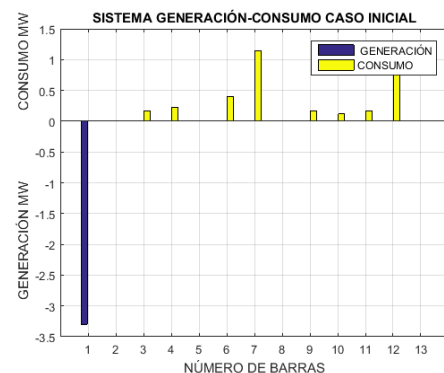


Figura 4. Capacidad del generador principal del sistema de 13 barras.

5.2. Análisis en condiciones iniciales del sistema de prueba caso 2

Si bien el un punto clave para el correcto funcionamiento de un sistema de distribución eléctrico es mantener los voltajes en 1 p.u. en las barras, que

sería lo óptimo, sin embargo, existen variaciones que alteran al sistema produciendo pérdidas que perjudican el correcto funcionamiento.

Para el análisis se graficó los voltajes p.u en los nodos del sistema de 13 barras en condiciones iniciales.

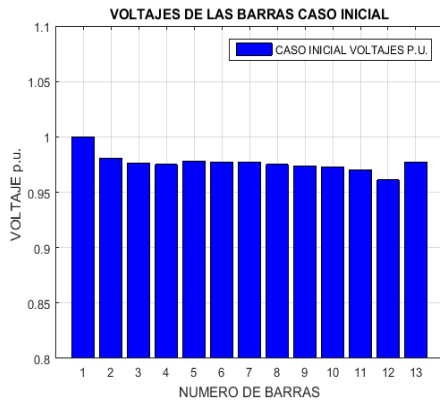


Figura 5. Voltajes iniciales del sistema de 13 barras.

5.3. Análisis del sistema con la integración de las micro-redes

De acuerdo con el sistema analizado y orientado a solucionar el problema de abastecer la demanda, manteniendo los márgenes de óptimos de operación, mediante los flujos de potencia, se pudo determinar la operación en los diferentes estados, visualizando el correcto funcionamiento de cada uno de los parámetro del sistema de 13 barras con la integración de las micro-redes y también identificar la dirección del flujo de potencia del sistema.

Con estos parámetros se obtendrá una correcta operación de protecciones, con el objetivo de poseer mayores beneficios de funcionamiento en micro-redes y su integración al sistema de distribución, tales como aspectos técnicos, económicos y ambientales. Para el estudio en la figura 6 se visualiza la incorporación de dos micro-redes en los nodos 12, nodo 13 con la finalidad mejorar el rendimiento del sistema.

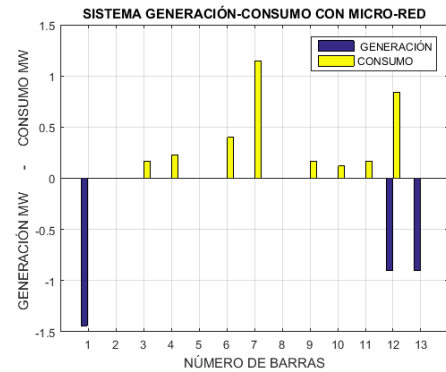


Figura 6. Incorporación de las Micro-redes

Una vez incluidas las dos micro-redes al sistema de generación, se consiguió redireccionar el flujo de potencia teniendo así un sistema confiable y seguro. Con esta consideración se debe cambiar la configuración de los equipos de protección (corriente pick-up y TMS) para tener una correcta operación. El modelamiento permite optimizar cada variable del sistema, como el parámetro voltaje que se visualiza en la figura 7, que en comparación con los datos de voltaje anteriormente graficados del sistema de prueba de 13 barras mejoraron, demostrando así que mediante la optimización los valores de voltaje, no existen ninguna restricción en integrar las micro-redes al sistema de distribución para tener un correcto funcionamiento. Para tener un mejor criterio de la optimización se muestra en la tabla 1 de manera porcentual.

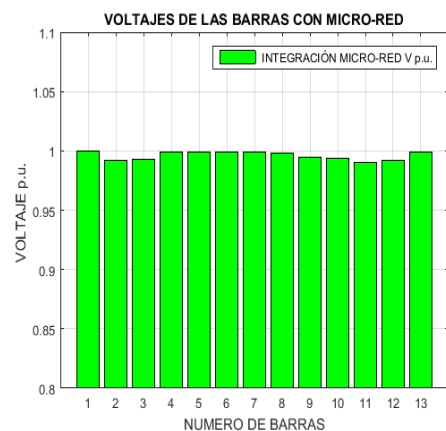


Figura 7. Voltajes P.U. a través de la interconexión de las micro-redes.

Tabla 1. V p.u Optimización en porcentaje

Sistema de 13 Barras	Análisis	
	V p.u Condiciones iniciales	V p.u Optimización
%	97%	99.2%

5.4. Análisis minimización de pérdidas con la conexión de micro-redes

En todos los sistemas eléctricos de distribución existen pérdidas activas, mediante la herramienta del programa de optimización se logró minimizar estas pérdidas, que incluye todos los parámetros del sistema de distribución y con la integración de un sistema de micro-redes. Con estos parámetros se logrará el correcto funcionamiento de las protecciones al momento de la integración a la red principal. En la figura 8 se visualiza la optimización del sistema mediante la minimización de pérdidas integrando varias micro-redes al sistema de prueba de 13 barras de un sistema de distribución. Se realizó una comparación entre las pérdidas activas del sistema de prueba, en el programa de simulación eléctrico y con el programa de optimización, demostrando que las pérdidas se han minimizado.

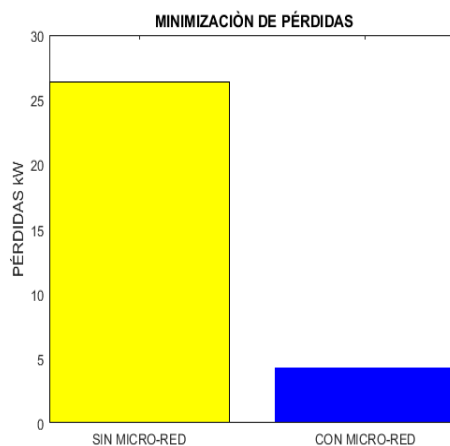


Figura 8. Minimización de pérdidas activas del sistema de 13 barras.

5.5. Análisis de la operación de protecciones en micro-redes

Para el análisis de la operación de las protecciones en micro-redes se ha considerado un criterio importante que se emplea al estudio de protecciones, que es el valor de la corriente de cortocircuito. Con la integración de las micro-redes al sistema de distribución de 13 barras utilizado para el caso de estudio, se realizó una simulación de una falla en el programa de simulación eléctrico en todas las barras del sistema y teniendo como resultado valores que se observan en la tabla 2.

Tabla 2. Corrientes de Cortocircuito

LOCALIZACIÓN	Icc Simulación	
	ICC	ICC Micro-red
B1	0.55	1.11
B2	4.54	9.32
B3	2.00	2.47
B4	1.64	1.94
B5	2.28	3.00
B6	2.28	3.00
B7	3.81	9.89
B8	2.79	4.91
B9	2.17	3.19
B10	0.88	1.00
B11	2.79	6.59
B12	1.53	6.31
B13	3.78	9.89

A pesar de las múltiples ventajas de tener micro-redes instaladas a la red principal, existen impactos negativos que afectan los relés de sobre-corriente bidireccional como la degradación y el bajo rendimiento en presencia de las micro-redes por las condiciones de corrientes de cortocircuito.

Con la ubicación de la micro-red existen cambios de los valores de corriente de cortocircuito teniendo un aumento considerable, tal como se observa en la figura 9.

Por tal razón se ven afectados los valores de configuración del relé de sobre-corriente.

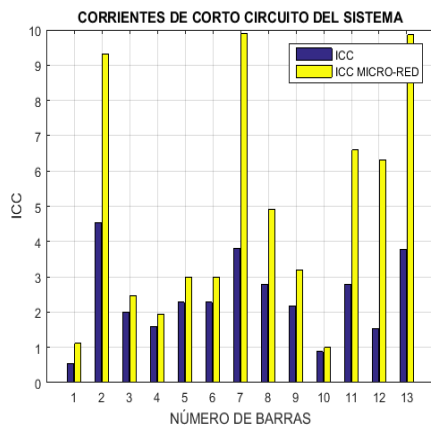


Figura 9. Corrientes de cortocircuito

La protección debe operar de tal manera que interactúe la micro-red con el sistema de distribución de manera bidireccional al flujo de potencia y tener una correcta operación. Es por esa razón que la comparación de las corrientes de corto circuito ayuda a configurar el alcance inferior o superior del relé de sobre-corriente y mejorar la sensibilidad general de los relés, para evitar con esto disparos en falso

6. Conclusiones

En esta investigación se empleó una metodología orientada en la operación de protecciones en micro-redes, que paralelamente con Flujos óptimos de potencia se pueda tener un sistema óptimo al momento de operar. El estudio de flujos óptimos de potencia es el inicio para desarrollar y emplear las diferentes técnicas con el objetivo de dar varias soluciones a los distintos problemas, como los voltajes p.u que mejoraron de manera significativa llegando a tener hasta un 99.2% aproximándose al valor ideal.

Además, la implementación de las micro-redes genera beneficios, uno de ellos es la flexibilidad, ya que al ser una red aislada puede instalarse en sitios estratégicos para mantener la

continuidad del servicio. También esta conexión de la micro-red ayudo a reducir las pérdidas activas de 26.4 kW a 4.26 kW del sistema de la distribución, en el caso de estudio desarrollado.

Igualmente, con la operación de protecciones, para la interconexión entre la red principal y las micro-redes, se modelo un flujo óptimo de potencia que permitirá al relé de sobre-corriente actuar de manera bidireccional para proteger a ambos sistemas en el caso que exista alguna falla, teniendo un incremento de corriente de cortocircuito en un 50% más que en las condiciones iniciales, en las barras 2, 7, 12 y 13.

Los flujos de potencia son una herramienta muy aplicable para analizar, estudiar, comprender y aprender el comportamiento del sistema de distribución que es parte componente primordial del SEP. Y a través de la programación no lineal, mediante las ecuaciones mencionadas, se demuestra un modelamiento casi real aplicado al sistema de 13 barras acoplado con las micro-redes.

Para la solución al problema de la investigación, de tener un sistema óptimo con la interconexión entre los sistemas de distribución y las nuevas tecnologías de generación como son las micro-redes. Se estudió casos y criterios de operación lo que incluye, la operación de protecciones, la minimización de perdidas, el control de flujos óptimos de potencia y con ello conservar un sistema con una correcta operación bidireccional.

7. Referencias

- [1] M. Yao, J. L. Mathieu, and D. K. Molzahn, "Using demand response to improve power system voltage stability margins," 2017 *IEEE Manchester PowerTech*, pp. 1–6, 2017.

- [2] A. Rath, S. R. Ghatak, and P. Goyal, "Optimal allocation of Distributed Generation (DGs) and static VAR compensator (SVC) in a power system using Revamp Voltage Stability Indicator," *2016 Natl. Power Syst. Conf. NPSC 2016*, 2017.
- [3] Y. Zhu, B. Qi, and J. V. Milanović, "Probabilistic ranking of power system loads for voltage stability studies in networks with renewable generation," *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur.*, 2017.
- [4] L. P. Sendagorta, "Optimal Power Flow for Distribution Networks," no. July, pp. 2–4, 2017.
- [5] E. Dallanese, K. Baker, and T. Summers, "Chance-Constrained AC Optimal Power Flow for Distribution Systems with Renewables," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 5, pp. 3427–3438, 2017.
- [6] D. Chavez and S. Espinoza, "Optimización del uso de la potencia reactiva en el sistema electrica ecuatoriano mediante la programacion no lineal," 2015.
- [7] M. Sagara, M. M. Sediqi, T. Senjyu, M. S. S. Danish, and T. Funabashi, "Voltage stability improvement by optimal active power and reactive power output control of storage battery system," *IEEE Reg. 10 Annu. Int. Conf. Proceedings/TENCON*, pp. 2671–2674, 2017.
- [8] P. Filho, J. Medeiros, and J. Silva, "Optimal Power Flow Calculation Method for Distribution Systems with Distributed Generation," pp. 1–4, 2012.
- [9] E. D. Anese, H. Zhu, and G. B. Giannakis, "<Distributed Optimal Power Flow for Smart Microgrids.pdf>," vol. 4, no. 3, pp. 1–12, 2013.
- [10] W. Caisapanta and D. Carrión, "Expansión de Sistemas de Transmisión Eléctrica Usando Criterios de Óptima Potencia AC," Universidad Politecnica Salesiana, 2016.
- [11] L. Buono, E. R. Sanseverino, M. Luisa, D. Silvestre, S. Bracco, and F. Delfino, "Distributed optimal power flow for islanded microgrids: An application to the Smart Polygeneration Microgrid of the Genoa University," *IEEE 2nd Int. Smart Cities Conf. Improv. Citizens Qual. Life, ISC2 2016 - Proc.*, 2016.
- [12] F. Ornelas-tellez, J. Ortiz-bejar, J. J. Rico, and E. N. Sanchez, "Optimal Operation and Control for an Electrical," 2015.
- [13] C. Vasquez and S. Espinoza, "Optimal location of distributed generation sources based on the voltage profile of electrical distribution systems." p. 22, 2016.
- [14] L. Chen and S. Mei, "An integrated control and protection system for photovoltaic microgrids," *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 1, no. 1, pp. 36–42, 2015.
- [15] A. Hooshyar and R. Iravani, "Microgrid Protection," *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 7, pp. 1332–1353, 2017.
- [16] V. Villa and A. Águila, "Óptima gestión y regulación de voltaje en microrredes de distribución con generación distribuida y almacenamiento de energía." 2017.
- [17] T. Nadu, "Power Flow Control and Protection in Micro-grid," pp. 424–429, 2013.

- [18] U. S. Banpurkar and P. S. Shete, "Coordination of protective relays for the protection of micro-grid," *2016 Int. Conf. Energy Effic. Technol. Sustain. ICEETS 2016*, pp. 448–453, 2016.
- [19] D. P. Mishra, S. R. Samantaray, and G. Joos, "A combined wavelet and data-mining based intelligent protection scheme for microgrid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 5, pp. 2295–2304, 2016.
- [20] H. M. Zeineldin, H. H. Sharaf, and E. El-Saadany, "Protection Coordination for Microgrids with Grid-Connected and Islanded Capabilities using Dual Setting Directional Overcurrent Relays," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3053, no. c, pp. 1–1, 2016.
- [21] S. Stp and K. S. Swarup, "Optimal Relay Coordination and Communication based Protection for Microgrid," pp. 1–5, 2017.
- [22] S. Choi and A. P. S. Meliopoulos, "Effective Real-Time Operation and Protection Scheme of Microgrids Using Distributed Dynamic State Estimation," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 32, no. 1, pp. 504–514, 2017.
- [23] N. K. Choudhary, S. R. Mohanty, and R. K. Singh, "A review on Microgrid protection," *2014 Int. Electr. Eng. Congr. iEECON 2014*, 2014.
- [24] E. Dehghanpour, H. Karegar, R. Kheirollahi, and T. Soleymani, "Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays in Microgrids by Using Cuckoo-Linear Optimization Algorithm and Fault Current Limiter," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3053, no. c, pp. 1–1, 2016.
- [25] F. Saraiva, L. Nordstr, and E. Asada, "Multi-Agent Systems Applied to Power Loss Minimization in Distribution-Level Smart Grid with Dynamic Load Variation," *IEEE Congr. Evol. Comput.*, pp. 217–224, 2017.
- [26] M. S. Tsai and C. C. Chu, "Applications of evolution programming for power distribution system loss minimization under load variations," *2011 IEEE PES Trondheim PowerTech Power Technol. a Sustain. Soc. POWERTECH 2011*, pp. 1–7, 2011.
- [27] K. Liu, W. Sheng, and S. Cheng, "Optimal power flow algorithm and analysis in distribution system considering distributed generation," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 8, no. 2, pp. 261–272, 2014.
- [28] A. H. Abdulwahid and S. Wang, "A new differential protection scheme for microgrid using Hilbert space based power setting and fuzzy decision processes," *2016 IEEE 11th Conf. Ind. Electron. Appl.*, pp. 6–11, 2016.
- [29] A. K. Sahoo, "Protection of microgrid through coordinated directional over-current relays," *2014 IEEE Glob. Humanit. Technol. Conf. - South Asia Satell. GHTC-SAS 2014*, pp. 129–134, 2014.
- [30] S. M. Brahma, J. Trejo, and J. Stamp, "Insight into microgrid protection," *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur.*, vol. 2015–Janua, no. January, pp. 1–6, 2015.
- [31] Y. Liu, A. P. Sakis Meliopoulos, R. Fan, and L.

- Sun, "Dynamic State Estimation based protection of microgrid circuits," *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 2015–Septe, 2015.
- [32] N. A. Mohamed and M. M. A. Salama, "A review on the proposed solutions to microgrid protection problems," *Can. Conf. Electr. Comput. Eng.*, vol. 2016–Octob, 2016.
- [33] I. Almutairy, "A review of coordination strategies and techniques for overcoming challenges to microgrid protection," *2016 Saudi Arab. Smart Grid Conf. SASG 2016*, pp. 1–4, 2017.
- [34] K. A. Saleh, H. H. Zeineldin, and E. F. El-Saadany, "Optimal Protection Coordination for Microgrids Considering N \$-\$1 Contingency," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 13, no. 5, pp. 2270–2278, 2017.
- [35] K. Sarwagya and P. K. Nayak, "An extensive review on the state-of-art on microgrid protection," *2015 IEEE Power, Commun. Inf. Technol. Conf. PCITC 2015 - Proc.*, pp. 862–866, 2016.
- [36] H. R. Esmaeilian and R. Fadaeinedjad, "Energy Loss Minimization in Distribution Systems Utilizing an Enhanced Reconfiguration Method Integrating Distributed Generation," *IEEE Syst. J.*, pp. 1–10, 2014.
- [37] R. S. Rao, K. Ravindra, K. Satish, and S. V. L. Narasimham, "Power Loss Minimization in Distribution System Using Network Reconfiguration in the Presence of Distributed Generation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 1, pp. 1–9, 2012.
- [38] M. Farrokhseresht, N. G. Paterakis, M. Gibescu, and J. G. Slootweg, "Minimization of distribution system losses by exploiting storage and anticipating market-driven behaviour of wind power producers," *Int. Conf. Eur. Energy Mark. EEM*, 2017.
- [39] X. Xu, J. Mitra, T. Wang, and L. Mu, "An evaluation strategy for microgrid reliability considering the effects of protection system," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 31, no. 5, pp. 1989–1997, 2016.

8. Estado del Arte

Tabla 3. Matriz del Estado del Arte

OPERACIÓN DE PROTECCIONES EN MICRO-REDES BASADO EN FLUJOS ÓPTIMOS DE POTENCIA AC																														
		DATOS		TEMÁTICA								FORMULACIÓN DEL PROBLEMA						RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA		SOLUCIÓN PROPUESTA							
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	MICRO-REDES	OPERACIÓN DE PROTECCIONES	ESTABILIDAD EN MICROREDES	CONDUCTIVIDAD	LOCALIZACIÓN FALLAS	ANÁLISIS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	FLEXIBILIDAD DE DISTRIBUCIÓN	RAPIDEZ DE INTERCONEXIÓN	INESTABILIDAD DE BALANCE DE POTENCIAS	RESPUESTA DE LA DEMANDA	CONGESTIÓN DE LA RED	TOPOLOGÍA DE LA RED	RESTRICCIONES DEL SISTEMA	INESTABILIDAD EN OPERACIÓN DE PROTECCIONES	BALANCE DE POTENCIAS	RESTRICCIONES EN MANEJO DE PARÁMETROS	INTERCONEXÓN DE MICRO-RED	LIMITACIONES DE LA MICRO-RED	MÉTODOS HEURÍSTICOS	FOP PROGRAMACION NO LINEAL	FOP DC	METODO DE NEWTON RAPHSON	SEGURIDAD DEL SISTEMA	MINIMIZACIÓN DE PERDIDAS	MEJORAMIENTO DE PARAMETROSDEL SISTEMA	MEJORAMIENTO DE LA DEMANDA	
1	2017	Using Demand Response to Improve Power System Voltage Stability Margins	\cite{M. Yao2017}						☒				☒				☒	☒							☒					☒
2	2017	Optimal Allocation of Distributed Generation (DGs) and Static VAR Compensator (SVC) in a power system using Revamp Voltage Stability Indicator	\cite{A. Rath/S. Ghatak2017}	☒		☒			☒			☒		☒							☒			☒				☒		
3	2017	Voltage Stability Improvement by Optimal Active Power and Reactive Power Output Control of Storage Battery System	\cite{M. Sagara/M. Sediqi2017}						☒	☒				☒	☒	☒								☒				☒		
4	2017	Probabilistic Ranking of Power System Loads for Voltage Stability Studies in Networks with Renewable Generation	\cite{Y. Zhu, B.Qi2017}	☒		☒					☒			☒							☒			☒			☒			
5	2017	Optimal Power Flow for Distribution Networks	\cite{F. Ornelas, J. Ortiz2017}	☒		☒				☒				☒		☒				☒	☒				☒					☒

OPERACIÓN DE PROTECCIONES EN MICRO-REDES BASADO EN FLUJOS ÓPTIMOS DE POTENCIA AC

	DATOS			TEMÁTICA							FORMULACIÓN DEL PROBLEMA						RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA		SOLUCIÓN PROPUESTA						
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	MICRO-REDES	OPERACIÓN DE PROTECCIONES	ESTABILIDAD EN MICROREDES	CONDUCTIVIDAD	LOCALIZACIÓN FALLAS	ANÁLISIS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	FLEXIBILIDAD DE DISTRIBUCIÓN	RAPIDEZ DE INTERCONEXIÓN	INESTABILIDAD DE BALANCE DE POTENCIAS	RESPUESTA DE LA DEMANDA	CONGESTIÓN DE LA RED	TOPOLOGÍA DE LA RED	RESTRICCIONES DEL SISTEMA	INEESTABILIDAD EN OPERACIÓN DE PROTECCIONES	BALANCE DE POTENCIAS	RESTRICCIONES EN MANEJO DE PARÁMETROS	INTERCONEXÓN DE MICRO-RED	LIMITACIONES DE LA MICRO-RED	MÉTODOS HEURÍSTICOS	FOP PROGRAMACION NO LINEAL	FOP DC	METODO DE NEWTON RAPHSON	SEGURIDAD DEL SISTEMA	MINIMIZACIÓN DE PERDIDAS	MEJORAMIENTO DE PARAMETROS DEL SISTEMA	MEJORAMIENTO DE LA DEMANDA
6	2017	Chance-Constrained AC Optimal Power Flow for Distribution Systems with Renewables	\cite{E. Dallanece, K. Baker2017}	☒							☒			☒				☒					☒		☒				
7	2016	A Combined Wavelet and Data-Mining Based Intelligent Protection Scheme for Microgrid	\cite{C. Vásquez, S. Espinosa2016}	☒	☒		☒	☒						☒	☒		☒												
8	2016	Distributed optimal power flow for islanded microgrids: an application to the Smart Polygeneration Microgrid of the Genoa University	\cite{L. Buono2016}	☒						☒				☒	☒			☒						☒			☒		
9	2013	Distributed Optimal Power Flow for Smart Microgrids	\cite{E. Anese, H. Zhu2013}	☒		☒								☒				☒		☒				☒			☒		
10	2012	Optimal Power Flow Calculation Method for Distribution Systems with Distributed Generation	\cite{P. Fiho, J. Medeiros2012}	☒	☒									☒				☒						☒		☒	☒	☒	
11	2015	Optimal Operation and Control for an Electrical Micro-grid	\cite{F. Ornelas2015}	☒				☒		☒				☒														☒	
12	2014	Optimal power flow algorithm and analysis in distribution system considering distributed generation	\cite{K. Liu2014}	☒			☒			☒				☒		☒	☒		☒		☒		☒				☒	☒	

OPERACIÓN DE PROTECCIONES EN MICRO-REDES BASADO EN FLUJOS ÓPTIMOS DE POTENCIA AC

DATOS			TEMÁTICA								FORMULACIÓN DEL PROBLEMA						RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA						
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	MICRO-REDES	OPERACIÓN DE PROTECCIONES	ESTABILIDAD EN MICROREDES	CONDUCTIVIDAD	LOCALIZACIÓN FALLAS	ANÁLISIS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	FLEXIBILIDAD DE DISTRIBUCIÓN	RAPIDEZ DE INTERCONEXIÓN	INESTABILIDAD DE BALANCE DE POTENCIAS	RESPUESTA DE LA DEMANDA	CONGESTIÓN DE LA RED	TOPOLOGÍA DE LA RED	RESTRICCIONES DEL SISTEMA	INEESTABILIDAD EN OPERACIÓN DE PROTECCIONES	BALANCE DE POTENCIAS	RESTRICCIONES EN MANEJO DE PARÁMETROS	INTERCONEXÓN DE MICRO-RED	LIMITACIONES DE LA MICRO-RED	MÉTODOS HEURÍSTICOS	FOP PROGRAMACIÓN NO LINEAL	FOP DC	METODO DE NEWTON RAPHSON	SEGURIDAD DEL SISTEMA	MINIMIZACIÓN DE PERDIDAS	MEJORAMIENTO DE PARAMETROS DEL SISTEMA	MEJORAMIENTO DE LA DEMANDA
13	2016	Protection Coordination for Microgrids with Grid-Connected and Islanded Capabilities using Communication Assisted Dual Setting Directional Overcurrent Relays	\cite{H. Zeineldin2016}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>								<input checked="" type="checkbox"/>						
14	2017	Optimal Relay Coordination suitable for Grid-Connected and Islanded operational modes of Microgrid	\cite{S. Stp2017}	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>								<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>							<input checked="" type="checkbox"/>
15	2017	Optimal Protection Coordination for Microgrids Considering N–1 Contingency	\cite{K. Saleh2017}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>							<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>		
16	2016	Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays in Microgrids by Using Cuckoo-Linear Optimization Algorithm and Fault Current Limiter	\cite{E. Dehghanpour2016}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>										<input checked="" type="checkbox"/>									<input checked="" type="checkbox"/>					
17	2015	An Integrated Control and Protection System for Photovoltaic Microgrids	\cite{L. Chen2015}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>									<input checked="" type="checkbox"/>									
18	2017	Optimal Relay Coordination and Communication based Protection for Microgrid	\cite{S. Stp.2017}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>		
19	2016	An Evaluation Strategy for Microgrid Reliability Considering the Effects of Protection System	\cite{X. Xu2016}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>		
20	2017	Effective Real-time Operation and Protection Scheme of Microgrids Using Distributed	\cite{S. Choi2017}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>											

OPERACIÓN DE PROTECCIONES EN MICRO-REDES BASADO EN FLUJOS ÓPTIMOS DE POTENCIA AC

	DATOS			TEMÁTICA							FORMULACIÓN DEL PROBLEMA						RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA						
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	MICRO-REDES	OPERACIÓN DE PROTECCIONES	ESTABILIDAD EN MICROREDES	CONDUCTIVIDAD	LOCALIZACIÓN FALLAS	ANÁLISIS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	FLEXIBILIDAD DE DISTRIBUCIÓN	RAPIDEZ DE INTERCONEXIÓN	INESTABILIDAD DE BALANCE DE POTENCIAS	RESPUESTA DE LA DEMANDA	CONGESTIÓN DE LA RED	TOPOLOGÍA DE LA RED	RESTRICCIONES DEL SISTEMA	INESTABILIDAD EN OPERACIÓN DE PROTECCIONES	BALANCE DE POTENCIAS	RESTRICCIONES EN MANEJO DE PARÁMETROS	INTERCONEXÓN DE MICRO-RED	LIMITACIONES DE LA MICRO-RED	MÉTODOS HEURÍSTICOS	FOP PROGRAMACION NO LINEAL	FOP DC	METODO DE NEWTON RAPHSON	SEGURIDAD DEL SISTEMA	MINIMIZACIÓN DE PERDIDAS	MEJORAMIENTO DE PARAMETROSEL SISTEMA	MEJORAMIENTO DE LA DEMANDA
21	2013	Power Flow Control and Protection in Micro-grid	\cite{T. Nadu2013}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>							<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>						
22	2016	Coordination of Protective Relays for the Protection of Micro-grid	\cite{U. Banpurkar2016}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>										
23	2014	A Review on Microgrid Protection	\cite{N. Choudhary2016}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>										
24	2014	Protection of Microgrid through Coordinated Directional Over-current Relays	\cite{A. Sahoo2014}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>							<input checked="" type="checkbox"/>								
25	2015	Insight into Microgrid Protection	\cite{S. Brahma2015}		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>							<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>									
26	2015	Dynamic State Estimation Based Protection of Microgrid Circuits	\cite{Y. Lui2015}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>							<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>							
27	2016	A Review on the Proposed Solutions to Microgrid Protection Problems	\cite{N. Mohamed2016}	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>									
28	2016	A New Differential Protection Scheme for Microgrid using Hilbert Space Based Power A Review of Coordination Strategies and	\cite{A. Abdulwahid2016}	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>											<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>								
29	2017	Techniques for Overcoming Challenges to Microgrid Protection	\cite{I. Almutairy2017}	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>								<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>								

OPERACIÓN DE PROTECCIONES EN MICRO-REDES BASADO EN FLUJOS ÓPTIMOS DE POTENCIA AC

	DATOS		TEMÁTICA							FORMULACIÓN DEL PROBLEMA						RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA		SOLUCIÓN PROPUESTA								
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	MICRO-REDES	OPERACIÓN DE PROTECCIONES	ESTABILIDAD EN MICROREDES	CONDUCTIVIDAD	LOCALIZACIÓN FALLAS	ANÁLISIS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	FLEXIBILIDAD DE DISTRIBUCIÓN	RAPIDEZ DE INTERCONEXIÓN	INESTABILIDAD DE BALANCE DE POTENCIAS	RESPUESTA DE LA DEMANDA	CONGESTIÓN DE LA RED	TOPOLOGÍA DE LA RED	RESTRICCIONES DEL SISTEMA	INESTABILIDAD EN OPERACIÓN DE PROTECCIONES	BALANCE DE POTENCIAS	RESTRICCIONES EN MANEJO DE PARÁMETROS	INTERCONEXIÓN DE MICRO-RED	LIMITACIONES DE LA MICRO-RED	MÉTODOS HEURÍSTICOS	FOP PROGRAMACION NO LINEAL	FOP DC	METODO DE NEWTON RAPHSON	SEGURIDAD DEL SISTEMA	MINIMIZACIÓN DE PERDIDAS	MEJORAMIENTO DE PARÁMETROS DEL SISTEMA	MEJORAMIENTO DE LA DEMANDA
30	2017	Microgrid Protection	\cite{A. Hooshyar2017}	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>									
31	2016	An Extensive Review on the State-of-Art on Microgrid Protection	\cite{K. Sarwagya2016}	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>								<input checked="" type="checkbox"/>								
32	2015	Optimización del uso de la Potencia Reativa en el Sistema Eléctrico Ecuatoriano Mediante la Programación No Lineal	\cite{D. Chavez/S. Espinoza2015}				<input checked="" type="checkbox"/>											<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>						
33	2017	Óptima gestión y regulación de voltaje en microrredes de distribución con generación distribuida y almacenamiento de energía.	\cite{V. Villa/A. Águila2017}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>								
34	2016	Expansión de Sistemas de Transmisión Eléctrica Usando Criterios de Óptima Potencia AC	\cite{W. Caisapanta/D. Carrión2016}								<input checked="" type="checkbox"/>							<input checked="" type="checkbox"/>					<input checked="" type="checkbox"/>						
35	2017	Minimization of Distribution System Losses By Exploiting Storage and Anticipating Market-Driven Behaviour of Wind Power Producers	\cite{M. Farrokhseresht}																							<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	

OPERACIÓN DE PROTECCIONES EN MICRO-REDES BASADO EN FLUJOS ÓPTIMOS DE POTENCIA AC

	DATOS		TEMÁTICA							FORMULACIÓN DEL PROBLEMA							RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA		SOLUCIÓN PROPUESTA									
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	MICRO-REDES	OPERACIÓN DE PROTECCIONES		ESTABILIDAD EN MICROREDES	CONDUCTIVIDAD	LOCALIZACIÓN FALLAS	ANÁLISIS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	FLEXIBILIDAD DE DISTRIBUCIÓN	RAPIDEZ DE INTERCONEXIÓN	INESTABILIDAD DE BALANCE DE POTENCIAS	RESPUESTA DE LA DEMANDA	CONGESTIÓN DE LA RED	TOPOLOGÍA DE LA RED	RESTRICCIONES DEL SISTEMA	INESTABILIDAD EN OPERACIÓN DE PROTECCIONES	BALANCE DE POTENCIAS	RESTRICCIONES EN MANEJO DE PARÁMETROS	INTERCONEXÓN DE MICRO-RED	LIMITACIONES DE LA MICRO-RED	MÉTODOS HEURÍSTICOS	FOP PROGRAMACION NO LINEAL	FOP DC	METODO DE NEWTON RAPHSON	SEGURIDAD DEL SISTEMA	MINIMIZACIÓN DE PERDIDAS	MEJORAMIENTO DE PARAMETROSDEL SISTEMA	MEJORAMIENTO DE LA DEMANDA	
36	2017	Multi-Agent Systems Applied to Power Loss Minimization in Distribution-Level Smart Grid with Dynamic Load Variation	\cite{F. Saraiva2017}																				<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			
37	2014	Energy Loss Minimization in Distribution SystemsUtilizing an Enhanced Reconfiguration Method Integrating Distributed Generation	\cite{Esmaeilian2014}																	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
38	2012	Power Loss Minimization in Distribution System Using Network Reconfiguration in the Presence of Distributed Generation	\cite{R. Rao2012}																<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
39	2011	Applications of Evolution Programming for Power Distribution System Loss Minimization under Load Variations	\cite{M. Tsai2011}																					<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>			
			CANTIDAD:	29	16	10	6	11	8	9	10	3	3	17	9	7	9	8	9	13	10	2	15	4	0	5	14	6	3		

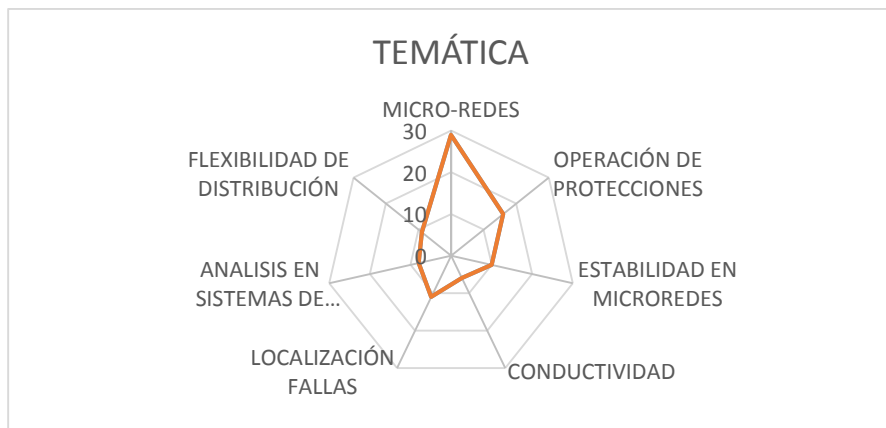


Figura 10. Indicadores del estado del Arte - Temática

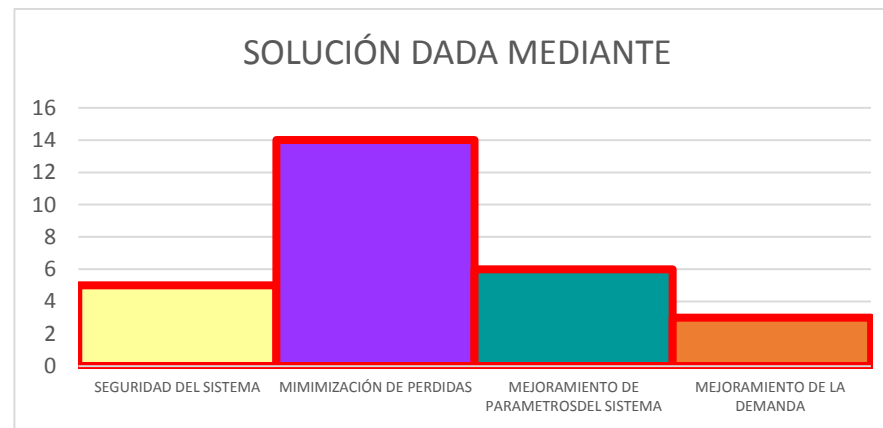


Figura 12. Indicadores del Estado de Arte - Solución

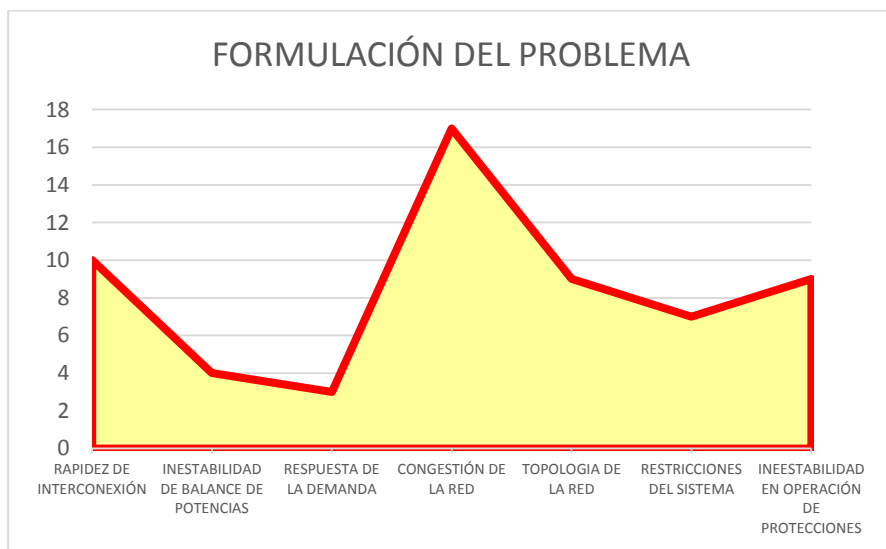


Figura 11. Indicadores del estado del Arte - Formulación del Problema